



TUGAS AKHIR - TE 141599

ANALISIS KARAKTERISTIK BUSUR API LISTRIK
TEGANGAN RENDAH PADA HUBUNG SINGKAT
LANGSUNG MELALUI SINKRONISASI PENGINDERAAN
BUNGA API DAN ARUS HUBUNG SINGKAT

Muhammad Yusron Irsyadi
NRP 2212 100 043

Dosen Pembimbing
Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

CHARACTERISTICS ANALYSIS OF LOW VOLTAGE ARC FLASH ON DIRECT SHORT CIRCUIT THROUGH SPARK IMAGING AND SHORT CIRCUIT CURRENT SYNCHRONIZATION

Muhammad Yusron Irsyadi
NRP 2212 100 043

Advisors

Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

**ANALISIS KARAKTERISTIK BUSUR API LISTRIK
TEGANGAN RENDAH PADA HUBUNG SINGKAT
LANGSUNG MELALUI SINKRONISASI PENGINDERAAN
BUNGA API DAN ARUS HUBUNG SINGKAT**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

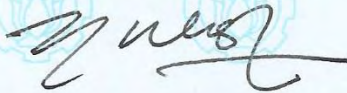
Menyutujui :

Dosen Pembimbing I,



Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T.
NIP. 198109052005011002

Dosen Pembimbing II,



Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001



ANALISIS KARAKTERISTIK BUSUR API LISTRIK TEGANGAN RENDAH PADA HUBUNG SINGKAT LANGSUNG MELALUI SINKRONISASI PENGINDERAAN BUNGA API DAN ARUS HUBUNG SINGKAT

Nama : Muhammad Yusron Irsyadi
Pembimbing I : Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T.
Pembimbing II : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Kasus kebakaran yang disebabkan oleh hubung singkat listrik (korsleting) pada tegangan rendah meningkat setiap tahun. Hal ini disebabkan arus yang tinggi pada saat gangguan terjadi tidak menyebabkan peralatan pengaman trip. Dalam eksperimen ini akan dilakukan simulasi kejadian hubung singkat pada kabel serabut tegangan rendah ukuran 1.5mm^2 , dengan variasi jumlah serabut yang mengalami kontak. Ketika busur api listrik terjadi, arus dan tegangan busur api akan direkam. Selain itu, dalam waktu yang sama, proses terjadinya busur api listrik akan direkam melalui kamera berkecepatan tinggi. Data arus dan tegangan akan disinkronisasikan dengan data hasil pencitraan busur api listrik pada kamera berkecepatan tinggi. Hasil sinkronisasi ini nantinya akan dianalisa, sehingga dapat menghasilkan data arus maksimum, arus sesaat sebelum terjadi penyalaan, arus ketika terjadi busur api listrik, dan kapan bunga api dan lelehan logam tersebar. Hasil studi ini diharapkan dapat membantu pembuatan alat proteksi busur api listrik tegangan rendah pada penelitian selanjutnya.

Kata Kunci: Busur Api Listrik Tegangan Rendah, Karakteristik Busur Api

CHARACTERISTICS ANALYSIS OF LOW VOLTAGE ARC FLASH ON DIRECT SHORT CIRCUIT THROUGH SPARK IMAGING AND SHORT CIRCUIT CURRENT SYNCHRONIZATION

Name : Muhammad Yusron Irsyadi
1st Advisor : Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T.
2nd Advisor : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

ABSTRACT

Fire cases caused by electrical short circuit (arc flash) in low voltage increase every year. It caused by high flow of current when the fault occurs are not tripping the protective device. In this experiment will be simulated events of short circuit on a 1.5mm² width low voltage strand cable, with variations in the number of strands that are in contact. When an electric arc occurs, the arc current and voltage will be recorded. In the same time, the occurrence of an electric arc will be recorded via a high-speed camera. Current and voltage data will be synchronized with the data of electrical arc imaging in the high-speed camera. This synchronization results will be analyzed, so as recognizes maximum current, momentary current before ignition, arc flash occurrence current, and when the spark occurred and the debris scattered. The results of this study is expected to design protective device that can detects low voltage arc flash in future studies.

Keywords: Low Voltage Arc Flash , Arc Flash Characteristics

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Metode Penelitian.....	2
1.6 Sistematika Laporan.....	3
 BAB II BUSUR API LISTRIK PADA TEGANGAN RENDAH	 5
2.1 Fenomena Busur Api Listrik (<i>Arc Flash</i>).....	5
2.2 Busur Api Listrik pada Kabel Tegangan Rendah.....	6
2.3 Akibat yang Ditimbulkan Busur Api Listrik.....	7
2.4 Karakteristik Busur Api Listrik pada Beban Resistif...	9
2.5 Penginderaan Citra Busur Api Listrik.....	11
 BAB III PERANCANGAN ALAT EKSPERIMEN, PENGAMBILAN DAN PENGOLAHN DATA	 13
3.1 Perancangan Alat Eksperimen.....	13
3.1.1 <i>Automatic Fuse</i> dan <i>Fuse Box</i>	14
3.1.2 Current Transformer	15
3.1.3 Kabel NYMHY 2x1,5mm ²	15
3.1.4 Beban Lampu 1000 Watt	16
3.1.5 <i>Arc Chamber</i> Akrilik	16
3.1.6 Casio EX-F1	16
3.1.7 NI 9246 dan NI 9223	16
3.1.8 Verivolt Entube DE-HB	17
3.1.9 Software LabVIEW	17

3.2 Pengambilan Data	18
3.3 Pengolahan Data	20
3.3.1 DIAdem	20
3.3.2 VLC Player: <i>Scene Filter</i>	21
3.3.3 Sinkronisasi Citra Bunga Api dengan Arus Hubung Singkat	23
BAB IV ANALISIS DATA	25
4.1 Mekanisme Terjadinya Busur Api Listrik pada Tegangan Rendah.....	25
4.1.1 Perekaman Data Arus, Tegangan dan Citra Bergerak Bunga Api	26
4.1.2 Sinkronisasi Data	27
4.2 Analisis Data Karakteristik Busur Api Listrik Tegangan Rendah pada Hubung Singkat Langsung	28
4.2.1 Arus Maksimum	28
4.2.2 <i>Inception Angle</i>	29
4.2.3 <i>Arc Ignition Current</i>	32
4.2.4 <i>Arc Flash Repetition</i>	32
4.2.5 <i>Fault Duration</i>	33
4.2.6 Fenomena <i>Post-Fault</i>	34
4.2.7 Penggantian <i>Fuse</i> Otomatis dengan MCB.....	37
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	39
5.2 Saran	40
DAFTAR PUSTAKA	41
RIWAYAT HIDUP PENULIS	43

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Spesifikasi CT	15
Tabel 3.2 Spesifikasi NI 9223 dan NI 9246	17
Tabel 4.1 Data arus maksimum yang terekam selama eksperimen	28
Tabel 4.2 Data nilai <i>arc ignition current</i> saat kontak berlangsung pada eksperimen	32
Tabel 4.3 Data arc flash repetition pada eksperimen	33
Tabel 4.4 Data durasi fault pada eksperimen	33
Tabel 4.5 Data status fuse trip pada eksperimen	34

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Busur api listrik akibat hubung singkat langsung pada kabel.....	5
Gambar 2.2 Kabel listrik yang mengalami kerusakan isolasi akibat pemanasan.....	6
Gambar 2.3 Kabel listrik yang mengalami kerusakan isolasi akibat gigitan tikus.....	7
Gambar 2.4 Sambungan kabel berlebihan dapat menjadi pemicu terjadinya arus lebih yang bisa menyebabkan busur api listrik.....	8
Gambar 2.5 Stop kontak yang terbakar akibat beban listrik yang berlebihan.....	8
Gambar 2.6 Karakteristik arus busur api listrik seri pada beban resistif.....	9
Gambar 2.7 Karakteristik tegangan saat terjadi busur api listrik setengah <i>cycle</i> pada beban resistif.....	10
Gambar 2.8 Tegangan dan arus saat terjadi busur api listrik.....	11
Gambar 3.1 Skema alat eksperimen busur api listrik pada tegangan rendah	13
Gambar 3.2 Alat eksperimen busur api listrik pada tegangan rendah.....	14
Gambar 3.3 Tampilan <i>front panel</i> dan <i>block diagram</i> pada LabVIEW untuk eksperimen busur api listrik.....	18
Gambar 3.4 Variasi jumlah serabut kabel untuk eksperimen busur api listrik: (a) serabut 1, (b) serabut 3, (c) serabut 6, (d) serabut 12, dan (e) serabut 24.....	19
Gambar 3.5 Kondisi kabel sebelum mengalami hubung singkat.....	20
Gambar 3.6 Tampilan <i>software</i> DIAdem.....	21
Gambar 3.7 Tampilan <i>software</i> VLC Player dengan fitur <i>scene filter</i>	22
Gambar 3.8 Hasil pengolahan video menggunakan fitur <i>scene filter</i>	22
Gambar 3.9 Tampilan antarmuka dalam melakukan sinkronisasi data.....	23

Gambar 4.1	Konstruksi kabel di dalam <i>Arc Chamber</i> . Gambar diambil saat kondisi sebelum busur api listrik terjadi.....	25
Gambar 4.2	Citra statik per frame dari rekaman kejadian busur api listrik, bergerak dari kiri ke kanan, kemudian ke kiri lagi di baris berikutnya.....	27
Gambar 4.3	3 Grafik hasil eksperimen dengan <i>inception angle</i> area ketiga (a), dengan tampilan citra statik per frame (b) yang menunjukkan kejadian yang sesuai ditunjukkan kursor pada grafik arus dan tegangan..	30
Gambar 4.4	Grafik hasil eksperimen dengan <i>inception angle</i> area kedua (a), dengan tampilan citra statik per frame (b) yang menunjukkan kejadian yang sesuai ditunjukkan kursor pada grafik arus dan tegangan..	31
Gambar 4.5	5 Fenomena makro <i>post-fault</i> pada eksperimen variasi 1 serabut (a), 3 serabut (b), dan 12 serabut (c). Gambar di sebelah kiri adalah kondisi sebelum eksperimen dilakukan, dan gambbar di kanan adalah setelah dilakukan eksperimen.....	35
Gambar 4.6	Grafik hasil eksperimen dengan variasi 3 serabut (a). Tampilan citra statik per frame pada eksperimen (b) menunjukkan step frame ketika proses busur api listrik berlangsung.....	37

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik sudah menjadi kebutuhan esensial untuk kehidupan sehari-hari manusia. Penggunaan listrik yang besar saat ini menuntut sistem keamanan listrik yang lebih handal, sehingga bisa mengurangi resiko terjadinya bahaya yang diakibatkan kesalahan operasi penggunaan listrik. Salah satu bahaya yang bisa ditimbulkan akibat penggunaan listrik adalah bahaya kebakaran akibat hubung singkat atau sering disebut korsleting. Kasus kebakaran yang diakibatkan hubung singkat setiap tahunnya meningkat. Berdasarkan data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) periode Agustus 2011 sampai dengan April 2015 dari 973 kasus kebakaran yang terjadi di pemukiman penduduk 644 diantaranya disebabkan oleh hubung singkat arus listrik yang disertai peristiwa busur api listrik. Busur api listrik diakibatkan oleh dua titik yang berbeda potensial yang mengalami kontak secara langsung atau melalui media konduktif tertentu. Hal ini dapat terjadi pada kabel atau konduktor tegangan rendah yang mengalami kerusakan isolasi karena pemanasan, penuaan, ataupun karena gangguan eksternal lain seperti dimakan binatang pengerat. Dari kejadian tersebut, dapat dikatakan bahwa gangguan hubung singkat pada sistem tegangan rendah yang menimbulkan busur api listrik sering kali tidak terdeteksi oleh sekering pengaman atau MCB.

Ketidakmampuan sekering pengaman maupun CB dalam mendeteksi busur api menyebabkan bahaya kebakaran tidak dapat dideteksi secara dini. Oleh karena itu, dalam studi ini akan dibahas beberapa permasalahan yaitu mengenai bagaimana mekanisme terjadinya busur api listrik, karakteristik busur api listrik, dan pengaruh jumlah serabut konduktor terhadap karakteristik busur api listrik yang terjadi pada hubung singkat langsung tegangan rendah. Dalam studi ini, dilakukan eksperimen busur api listrik dengan menggunakan suatu perangkat hubung-singkat buatan. Masalah dalam studi ini dibatasi pada analisis yang dilakukan terhadap hasil eksperimen busur api listrik tegangan rendah pada kabel serabut 1.5mm^2 dengan beban resistif. Hasil eksperimen berupa arus, tegangan, dan citra bunga api listrik diolah hingga didapatkan karakteristik berupa arus maksimum, arus ketika terjadi *arcing*, dan arus pada saat bunga api terjadi.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam eksperimen ini yaitu menentukan karakteristik dari busur api listrik yang berupa nilai arus ketika terjadi *arc flash*. Parameter yang selanjutnya yang dicari adalah fenomena-fenomena yang terjadi saat eksperimen berlangsung yang meliputi sudut penyalan (*ignition angle*), jarak waktu dari terjadinya kontak sampai terjadinya *ignition*, dan efek yang terjadi pada konduktor setelah terjadinya fenomena busur api listrik.

1.3 Batasan Masalah

Dalam menyelesaikan permasalahan pada eksperimen ini diperlukan batasan permasalahan. Sistem tegangan rendah yang digunakan adalah sistem tegangan jala-jala dari PLN 220V. Dalam pengolahan data arus dan tegangan yang terekam, analisa dilakukan pada magnitudo dari arus dan tegangan yang terekam.

1.4 Tujuan

Tujuan dari eksperimen ini adalah untuk mengetahui karakteristik busur api listrik yang menyebabkan letupan bunga api yang menyebar ke segala arah. Dari karakteristik ini, akan diketahui fenomena-fenomena yang terjadi selama busur api listrik berlangsung.

1.5 Metode Penelitian

Dalam eksperimen ini, diperlukan metode penelitian yang tepat agar pelaksanaan eksperimen sesuai dengan perencanaan. Metode penelitian pada eksperimen ini meliputi studi literatur, persiapan, pengambilan data, pengolahan data, dan penarikan kesimpulan.

Dalam studi literatur, pengumpulan referensi dilakukan untuk mencari definisi, pengertian, dan semua tulisan yang berhubungan dengan eksperimen ini. Beberapa kata kunci yang bisa disebutkan untuk studi literatur ini seperti busur api listrik, hubung singkat, pengindraan frame rate tinggi, arus hubung singkat, switching, metode akuisisi data, dsb. Dari literatur-literatur yang didapat ini, nantinya diadopsi sebagian isinya sebagai pendukung dalam eksperimen ini.

Setelah pengumpulan dan studi literatur terlaksanakan, selanjutnya adalah persiapan segala hal yang dibutuhkan untuk penulisan eksperimen ini. Yang harus disiapkan untuk penulisan eksperimen ini adalah peralatan-peralatan yang diperlukan dalam pengamatan dan perekaman busur api listrik. Nantinya akan dibuat

sebuah alat yang mensimulasikan hubung singkat langsung berupa arc chamber yang terhubung ke beban lampu filamen. Alat lain yang harus disiapkan adalah obyek uji, yaitu kabel NYMHY 1.5mm², dan instrumen untuk akuisisi data, yaitu Casio EF-X1 untuk penginderaan citra busur api, NI 9223 dan NI 9246 untuk merekam tegangan dan arus hubung singkat yang dihubungkan ke NI Labview.

Pengambilan data ini bertujuan untuk pengolahan data pada eksperimen. Metode pengambilan data nantinya menggunakan DAQ yang terhubung pada komputer untuk merekam arus dan tegangan, dan menggunakan kamera frame rate tinggi untuk merekam citra bunga api. Pengujian akan dilakukan dengan variabel beban dan jumlah serabut pada kabel NYMHY.

Pengolahan data dalam penulisan eksperimen ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik busur api listrik pada kasus hubung singkat. Data yang diperoleh dari pengambilan data, nanti akan diolah menggunakan Labview dan Ms. Excel untuk mengetahui. Data yang diolah adalah data arus, tegangan, dan citra busur api listrik. Ketiga data ini nantinya akan dikombinasikan sehingga didapatkan grafik arus dan tegangan ketika hubung singkat yang akan dicocokkan dengan sekuen citra bunga api yang terekam menggunakan kamera frame rate tinggi.

Memberikan kesimpulan bagaimana karakteristik busur api listrik pada kasus hubung singkat tegangan rendah dengan pengaruh jumlah serabut yang bersentuhan, beban terpasang, dan sebaran bunga apinya.

1.6 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan eksperimen ini terdiri dari lima bagian. Setiap bagian memiliki lingkup pembahasan masing-masing.

Bab pertama merupakan pendahuluan yang berisikan latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, manfaat, metodologi, dan sistematika penulisan.

Bab kedua menjelaskan tentang landasan teori fenomena busur api listrik pada tegangan rendah, akibat yang ditimbulkan, mekanisme terjadinya busur api listrik dan karakteristik busur api listrik (berdasarkan studi pustaka yang telah ada sebelumnya).

Bab ketiga akan membahas tentang pembuatan alat eksperimen busur api listrik, bahasa pemrograman LabVIEW, pengambilan dan pengolahan data berupa “arus” dan “tegangan” saat busur api listrik terjadi pada beberapa media dengan memperhatikan jumlah serabut

konduktor kabel (untuk media padat) dan jarak terjadinya busur api (untuk media larutan) menggunakan beberapa *software* penunjang yaitu DIAdem, Matlab, dan Ms. Excel. Pada proses pengambilan data, dapat diketahui fenomena dan mekanisme proses terjadinya busur api listrik pada tegangan rendah.

Bab keempat akan dibahas mengenai analisis data dari hasil eksperimen. Dari hasil analisis tersebut dapat dibuat suatu kesimpulan mengenai perbedaan pengaruh media logam, non-logam dan media larutan listrik; pengaruh impedansi hubung singkat; pengaruh jumlah serabut konduktor kabel (media padat); dan pengaruh jarak (media larutan) terhadap karakteristik arus, daya, energi ataupun durasi busur api.

Bab kelima merupakan penutup dari eksperimen. Bab lima berisikan kesimpulan dari hasil eksperimen yang telah dilakukan dan juga berisi saran-saran. Kesimpulan diambil melalui pengamatan parameter-parameter yang mengalami perubahan akibat suatu perlakuan

BAB II

BUSUR API LISTRIK PADA TEGANGAN RENDAH

2.1 Fenomena Busur Api Listrik (*Arc Flash*)

Percikan listrik atau *electric sparking*, terjadi ketika dua permukaan konduktif mendekat secara bersamaan, kemudian diikuti lompatan arus melewati sela antara konduktor dikarenakan nilai tegangan yang cukup. *Spark* ini akan mengionisasi udara, sehingga udara menjadi konduktif, kemudian membentuk busur api listrik yang menjaga proses ionisasi, sehingga kedua permukaan tersebut terhubung singkat [1]. Saat terjadi hubung singkat, nilai arus yang melewati konduktor akan mengalami peningkatan yang tinggi akibat penurunan impedansi yang drastis. Nilai arus yang besar ini menyebabkan panas berlebih dan bisa menimbulkan busur api listrik atau *arc flash* pada titik hubung singkat yang bisa membahayakan manusia dan benda-benda yang dekat dengan titik terjadinya hubung singkat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Busur api listrik akibat hubung singkat langsung pada kabel (sumber: www.tdgaerospace.com)

Definisi *arc flash* menurut NFPA [2] adalah sebuah pelepasan energi yang berupa cahaya dan panas dari penguapan dan ionisasi dari sebuah material. Produk dari *arc flash* ini berupa plasma hasil ionisasi konduktor. Bahaya yang ditimbulkan dari *arc flash* adalah luka bakar

yang serius jika terpapar pada kulit. Jika lelehan logam yang tersebar akibat *arc flash* ini mengalami kontak dengan benda yang mudah terbakar, seperti kain tekstil dan kertas, bisa memicu terjadinya kebakaran. Jika terpapar pada zat eksplosif bisa menimbulkan ledakan.

2.2 Busur Api Listrik pada Kabel Tegangan Rendah

Busur api listrik yang diawali karena terjadinya kontak langsung maupun tak langsung antar konduktor yang berbeda potensial bisa terjadi akibat isolasi peralatan listrik yang tidak memenuhi standar. Contoh peralatan listrik pada area distribusi yang sering mengalami kerusakan isolasi adalah kabel. Kabel pada tegangan rendah biasanya memiliki isolasi yang terbuat dari bahan yang rapuh dan mudah sekali rusak akibat penuaan (*aging*), pemanasan berlebih seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2., atau juga gangguan eksternal lainnya seperti gigitan hewan pengerat contohnya tikus, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3. Hal ini menyebabkan kegagalan isolasi, yaitu peristiwa ketika arus dalam kabel mampu terhantar keluar dari isolatornya dan sangat memungkinkan terjadi hubungan singkat antar konduktor didalamnya.

Kabel pada tegangan rendah secara umum terbuat dari tembaga dan aluminium. Kabel tembaga yang paling sering digunakan. Jika diklasifikasikan lagi kabel terbagi menjadi dua, kabel konduktor serabut dan kabel konduktor tunggal.



Gambar 2.2 Kabel listrik yang mengalami kerusakan isolasi akibat pemanasan (sumber: sadhanas.co.id)

Penggunaan kabel konduktor jenis serabut lebih banyak karena harganya yang relatif lebih murah daripada kabel konduktor tunggal. Kabel konduktor serabut yang digunakan pada perangkat tegangan rendah



Gambar 2.3 Kabel listrik yang mengalami kerusakan isolasi akibat gigitan tikus (sumber: mybelor.wordpress.com)

biasanya memiliki ukuran penampang sebesar 0.75 mm^2 , 1.5 mm^2 , 2.5 mm^2 , dan lain-lain. Setiap jenis ukuran kabel tersebut memiliki spesifikasi Kemampuan Hantar Arus (KHA), yaitu arus nominal yang bisa dihandalkan pada kabel. Untuk pemasangan area perumahan atau pemukiman, kabel 1.5 mm^2 merupakan kabel yang paling sering digunakan. Kabel serabut 1.5 mm^2 memiliki KHA nominal sebesar 10A. Artinya, kabel 1.5 mm^2 mampu menghantarkan arus sampai dengan 10A [4]. Jika kabel dialiri arus nominal lebih dari KHA nominal dalam waktu tertentu, maka kabel bisa mengalami kerusakan seperti kabel mengalami pemanasan, melelehnya isolasi, atau bahkan melelehnya konduktor.

2.3 Akibat yang Ditimbulkan Busur Api Listrik

Kasus kebakaran yang terjadi di Indonesia mayoritas disebabkan oleh kesalahan operasi listrik yang secara redaksional sering kali disebut hubungan arus pendek. Dalam kasus kebakaran yang diakibatkan kesalahan operasi listrik, fenomena busur api listrik adalah pemegang peran penting dalam memicu kebakaran. Nilai arus yang besar ketika terjadi busur api listrik ternyata tidak bisa membuat perangkat pengaman listrik konvensional seperti MCB (*Miniature Circuit Breaker*) atau Sekring Otomatis (*Automatic Fuse*) pada perumahan dan pemukiman

memutus rangkaian utama. Hal ini dikarenakan durasi terjadinya hubung singkat tidak cukup untuk membuat peralatan pengaman untuk mengalami trip.

Dalam kurun waktu 2011 sampai dengan 2015, lebih dari 65% kasus kebakaran terjadi karena adanya hubung singkat listrik yang diikuti dengan peristiwa busur api listrik [5]. Umumnya kebakaran terjadi di pemukiman padat penduduk yang rentan terjadi korsleting listrik (hubung



Gambar 2.4 Sambungan kabel berlebihan dapat menjadi pemicu terjadinya arus lebih yang bisa menyebabkan busur api listrik (sumber: kantorsehat.wordpress.com)



Gambar 2.5 Stop kontak yang terbakar akibat pemasangan kontak yang kurang rapat. (sumber: www.ideonline.co.id)

singkat listrik) karena instalasi listrik yang cenderung tertata tidak rapi dan kemungkinan terjadi hubung singkat sangat tinggi. Instalasi yang rumit dan tidak rapi (asal tempel dan sambungan yang kurang rapat) dan impedansi saluran yang tinggi dapat menyebabkan gangguan tidak terdeteksi oleh perangkat pengaman listrik.

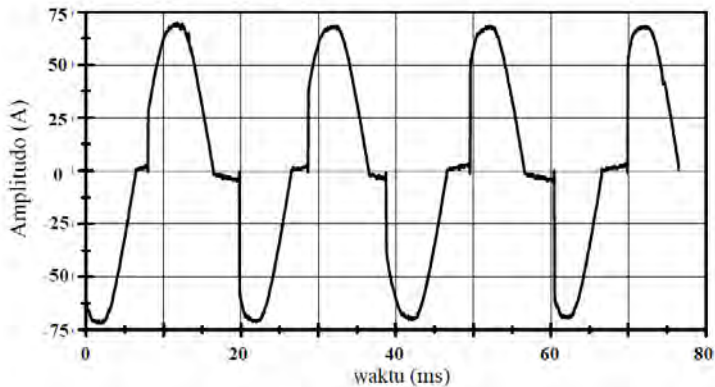
Dalam beberapa kasus hubung singkat, arus hubung singkat ternyata tidak menimbulkan putusnya fuse atau terbakarnya breaker. Smoak dan Keeth [6] melakukan eksperimen hubung singkat pada trafo 50 kVA dan 167 kVA dengan rating tegangan 240V. Hasilnya adalah hubung singkat *non-bolted* dengan panjang *arc* yang bervariasi tidak menyebabkan meleburnya fuse, atau pengaman arus tidak bekerja.

2.4 Karakteristik Busur Api Listrik pada Beban Resistif

Karakteristik busur api listrik pada beban resistif telah diteliti sebelumnya. Karakteristik tersebut meliputi arus, tegangan, energi dan durasi.

Beberapa karakteristik umum arus busur api listrik pada beban resistif yang telah diidentifikasi antara lain [7]:

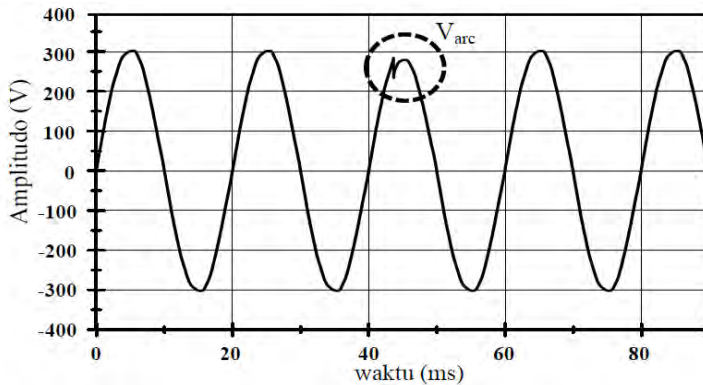
1. Di setiap setengah cycle, arus memiliki dua nilai yaitu tidak bernilai (seolah-olah bernilai nol) dan bernilai ,begitu seterusnya setiap setengah cycle . Karakter ini hampir sama dengan rangkaian thyristor yang penyalannya diatur seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.6.
2. Laju kenaikan dan maksimum (*max*) arus biasanya selalu lebih besar dibanding arus beban normal.



Gambar 2.6 Karakteristik arus busur api listrik seri pada beban resistif.

3. Busur api listrik bukanlah fenomena dengan bentuk gelombang stasioner, segmen arusnya dapat berdampingan dengan segmen aliran arus normal.
4. Muncul *noise* frekuensi tinggi pada arus busur api listrik (dari 10kHz sampai dengan 1GHz)
5. Pada busur api listrik seri (*series arcing fault*), arusnya lebih kecil dibanding arus non-gangguan pada rangkaian yang sama
6. Sedangkan pada busur api listrik paralel (*parallel arcing fault*), arusnya meningkat secara signifikan. Arus busur api lebih besar dibanding arus normal.

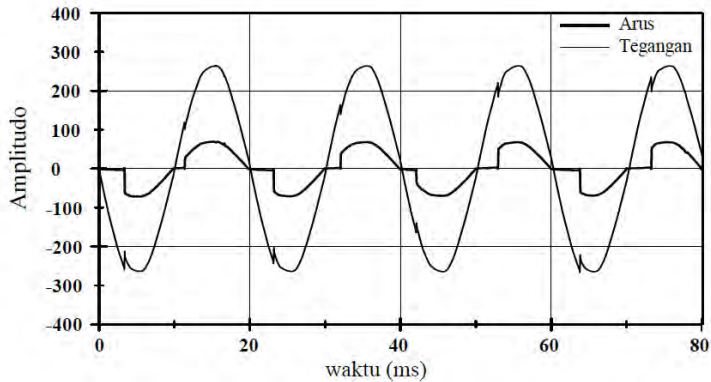
Sedangkan karakteristik tegangan pada saat terjadi busur api listrik dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 Karakteristik tegangan saat terjadi busur api listrik setengah cycle pada beban resistif

Beberapa karakteristik tegangan berdasarkan penelitian [9]:

1. Nilai tegangan turun pada saat terjadi busur api listrik dan terdapat sedikit cacat pada tegangannya.
2. Tegangan akan konstan (bentuk dan nilainya) selama busur api listrik berlangsung.
3. Bentuk gelombang (*waveform*) tegangan dan arusnya memiliki polaritas yang sama seperti pada Gambar 2.8



Gambar 2.7 Tegangan dan arus saat terjadi busur api listrik.

Sedangkan untuk karakteristik energi besarnya tergantung pada arus dan waktu. Semakin besar arus dan durasi busur api listrik, energi yang dikonsumsi akan semakin besar. Selanjutnya, arus yang nilainya besar akan menyebabkan frekuensi terjadinya busur api listrik lebih banyak sehingga total energi yang dikonsumsi akan semakin lebih besar [9].

2.5 Penginderaan Citra Busur Api Listrik

Arus yang menyebabkan busur api listrik tegangan rendah memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi sistem, yaitu 50 Hz. Ini berarti bahwa satu *cycle* arus memiliki durasi sepanjang 20 ms. Untuk melakukan penginderaan citra arus *arcing* ini, maka dibutuhkan piranti perekam citra yang mampu merekam fenomena *arcing* ini. McBride dan Zhang menggunakan divais yang bernama CCD (*Charge-Coupled Device*) Camera untuk merekam citra dari pergerakan *arc* pada *arc chamber* [11][12]. Kamera digital yang ada di pasaran rata-rata memiliki kecepatan sebesar 120 fps. Dengan kecepatan sebesar ini, maka dalam satu *cycle* arus yang terekam akan menghasilkan 2 frame saja. Agar mendapatkan frame yang lebih banyak, maka diperlukan kamera dengan kecepatan yang lebih tinggi. Dengan menggunakan kamera berkecepatan minimal 1000 fps, maka dalam satu *cycle* arus yang terekam bisa mendapatkan 20 frame.

Halaman ini sengaja dikosongkan

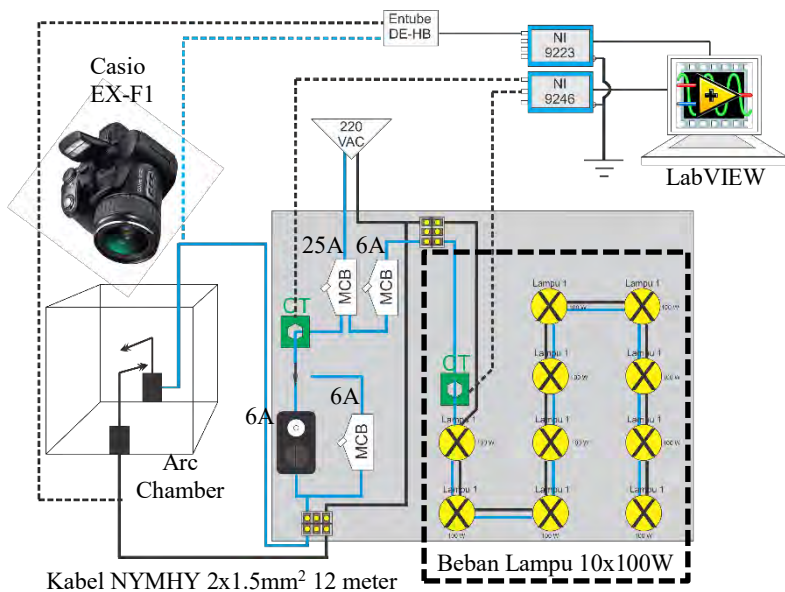
BAB III

PERANCANGAN ALAT EKSPERIMEN, PENGAMBILAN DAN PENGOLAHAN DATA

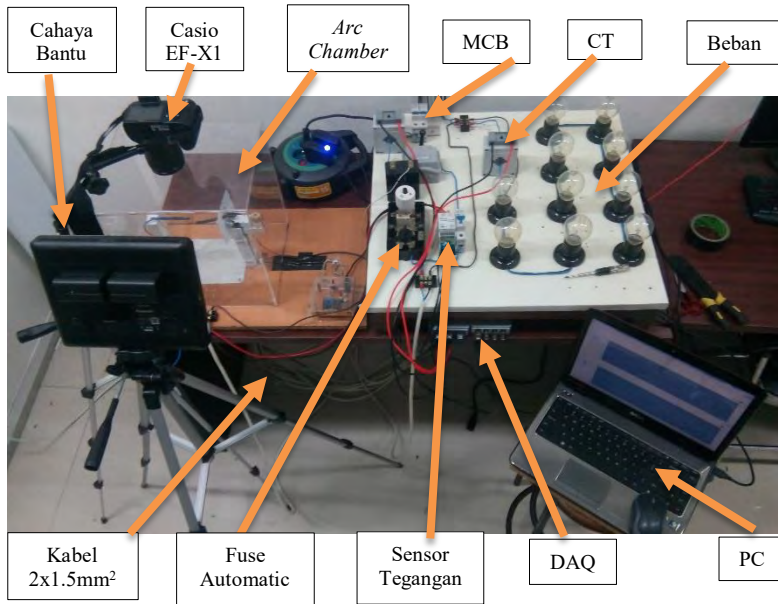
Dalam bab ini akan dijelaskan mengenai perancangan alat eksperimen busur api listrik pada tegangan rendah, proses pengambilan dan pengolahan data busur api listrik.

3.1 Perancangan Alat Eksperimen

Alat eksperimen pada pengerjaan tugas akhir ini untuk memodelkan fenomena terjadinya busur api listrik secara langsung pada kabel tegangan rendah. Skema rangkaian eksperimen ditunjukkan oleh Gambar 3.1, dan alat eksperimen ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3.1 Skema alat eksperimen busur api listrik pada tegangan rendah



Gambar 3.2 Alat eksperimen busur api listrik pada tegangan rendah

Rangkaian eksperimen busur api listrik terdiri dari *hardware* dan *software*. *Hardware* yang digunakan adalah sekering otomatis (*fuse*) 6A, *fuse box*, *current transformer* (CT) 200/5 A, kabel tembaga serabut 1 fasa ukuran penampang 1,5 mm² (kabel NYMHY 2x1,5mm²), beban resistif berupa lampu 100 watt sebanyak 10 buah, *arc chamber* yang terbuat dari akrilik, Casio EX-F1 sebagai perekam citra bunga api, NI 9246 sebagai perekam arus, dan NI 9223 sebagai perekam tegangan dengan bantuan sensor tegangan Verivolt Entube DE-HB sebagai *matching impedance*. Sedangkan *software* yang mendukung alat eksperimen ini adalah *software* LabVIEW yang telah disinkronkan dengan fitur *DAQ Assist*, untuk *human interface* sekaligus sebagai akuisisi data saat proses pengambilan data berlangsung.

3.1.1 Automatic Fuse (Sekering Otomatis) dan Fuse Box

Fuse pada alat eksperimen ini digunakan sebagai pembatas arus dan pengaman saat pengambilan data dilakukan. *Fuse* yang digunakan dalam eksperimen ini *fuse* SNI bright-G 6A 220/380V (IEC 60898),

beserta *fuse box* standar yang mudah dibeli di toko listrik kecil maupun besar

3.1.2 Current Transformer (CT)

Trafo arus (*current transformer*/CT) pada alat eksperimen ini digunakan untuk pengubah skala arus listrik pada saat pengukuran arus. CT yang digunakan merupakan CT untuk pengukuran. Pada eksperimen ini dibutuhkan skala dalam ampere yang lebih kecil disisi sekunder karena pada saat pengambilan data berlangsung, diperkirakan arus busur api listrik nilainya berada di atas nilai maksimal masukan arus pada alat akuisisi data (NI 9246). Berikut ini spesifikasi CT yang digunakan dalam eksperimen ini:

Tabel 3.1 Spesifikasi CT

Jenis CT	Powell MSQ-30
Rasio CT	200/5
Class CT	1
Burden CT	5
Range Frekuensi	50-60 Hz

CT dengan rasio primer/sekunder : 200/5A berarti output dari sekunder CT akan bernilai 5A apabila sisi primer dilalui arus 200A. Nilai *class* CT menunjukkan tingkat akurasi yang dimiliki CT. CT dengan *class* 1 berarti CT tersebut memiliki tingkat kesalahan sebesar 1%. Burden CT menunjukkan kemampuan CT terhadap nilai impedansi tertentu. Berdasarkan standart IEC 60044-1 (BSEN 60044-1) burden CT memiliki nilai 1,5 VA; 3VA; 5VA.

3.1.3 Kabel NYMHY 2x1,5mm²

Kabel pada tegangan rendah merupakan komponen yang sangat rentan terhadap kerusakan isolasi karena pemanasan dan gangguan hewan seperti tikus yang kerap memicu terjadinya hubung singkat yang berakhir pada peristiwa kebakaran karena pengaman konvensional tidak dapat mendeteksi gangguan.

Oleh sebab itu, dalam Tugas Akhir ini eksperimen dilakukan pada kabel. Kabel yang digunakan adalah kabel NYMHY 2x1,5mm². kabel NYMHY 2x1,5mm² adalah kabel tembaga dengan konduktor serabut 1 fasa dengan luas penampang 1,5mm² dengan selubung PVC luar dan dalam. Kabel jenis ini merupakan penghantar fleksibel (*flexible wire*). Panjang kabel yang digunakan pada eksperimen ini sebesar 12 meter. Hal

ini dilakukan karena rata-rata kabel yang digunakan di pada sistem instalasi khususnya pemukiman penduduk dan pasar tradisional adalah kabel 1,5mm².

Kabel serabut 1,5mm² memiliki arus nominal sebesar 10A yang bisa digunakan pada pemukiman penduduk dengan daya terpasang sebesar 900 VA maupun 1300 VA. Namun, rata-rata lingkungan padat penduduk menggunakan daya 900 VA.

3.1.4 Beban Lampu 1000 Watt

Alat eksperimen untuk pengambilan data busur api listrik menggunakan beban resistif yang terdiri dari bola lampu 100 watt sebanyak 10 buah. Jika dijumlahkan beban total sebesar 1000 watt. Dipilih beban 1000 watt, karena eksperimen dibuat natural mendekati seperti realita di lapangan. Daya yang terpasang pada pemukiman dan pasar tradisional rata-rata sebesar 1300 VA dan 2200 VA.

3.1.5 Arc Chamber Akrilik

Arc Chamber digunakan sebagai wadah terjadinya busur api listrik agar saat eksperimen dilakukan, busur api tidak menyebar ke arah yang tidak diinginkan. *Arc Chamber* yang digunakan terbuat dari bahan akrilik dengan tebal 2 mm, digunakan akrilik karena akrilik lebih rendah dalam menyerap panas daripada kaca sehingga saat eksperimen busur api listrik dengan panas berlebih, *chamber* tidak cepat panas. *Chamber* yang digunakan berukuran panjang sebesar 30 cm, lebar sebesar 15 cm, dan tinggi sebesar 20 cm.

3.1.6 Casio EX-F1

Casio EX-F1 adalah kamera keluaran Casio yang digunakan untuk merekam citra bergerak dari busur api yang terjadi di dalam *arc chamber*. Casio EX-F1 memiliki spesifikasi kecepatan perekaman sebesar 1200 fps dengan resolusi 336x996 pixels. Dari hasil perekaman menggunakan EX-F1 ini, akan dilakukan *frame extraction* untuk mendapatkan data *still image* per frame yang nantinya akan disinkronisasikan dengan arus hubung singkat.

3.1.7 NI 9246 dan NI 9223

NI 9246 dan NI 9223 merupakan *Compact DAQ(cDAQ)* atau *Analogue Input Module* yang digunakan sebagai akuisisi data. Kedua produk ini merupakan keluaran dari National Instruments. Dalam

penggunaannya, kedua alat ini akan dihubungkan ke PC yang menjalankan program LabVIEW. NI 9246 adalah alat yang digunakan untuk merekam arus. Alat ini dilengkapi dengan 3 input analog terisolasi, dengan *sample rate* sebesar 50 kHz tiap channel secara simultan. Dua slot channel pada NI 9246 akan digunakan untuk mengukur arus *arcng* dan arus beban. NI 9223 adalah alat yang digunakan untuk merekam tegangan *arcng* yang digunakan untuk sinkronisasi dengan arus hubung singkat dan citra bunga api yang terekam. Spesifikasi NI 9246 dan NI 9223 dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Spesifikasi NI 9223 dan NI 9246

NI 9223	
Range Tegangan Input	+/- 10 V
Impedansi Input	>1 G Ω
Sample Rate	1 MHz
NI 9246	
Range Arus Input	+/- 20 A
Sample Rate	50 kHz

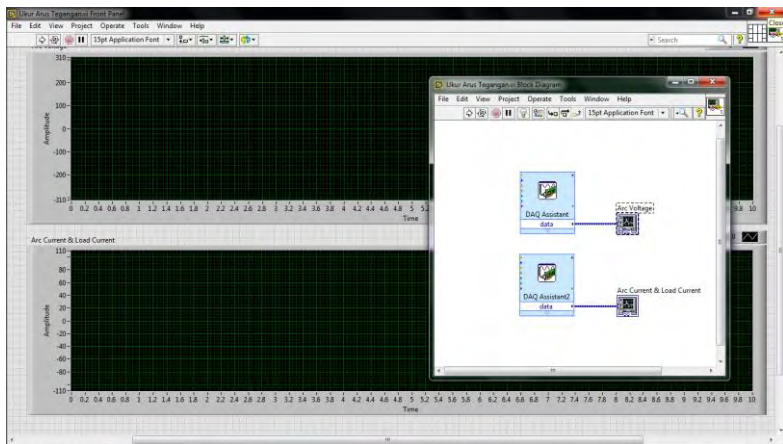
3.1.8 Verivolt Entube DE-HB

Antar muka dalam penggunaan DAQ memerlukan impedansi masukan yang tinggi. Dalam kasus ini, pengukuran tegangan menggunakan probe tegangan konvensional tidak memungkinkan untuk melakukan pengukuran dan perekaman data tegangan. Verivolt Entube DE-HB merupakan sensor tegangan dengan masukan tegangan maksimal 2000V, dan tegangan output maksimal 10V. Alat ini akan mengakomodasi impedansi tinggi sebagai input pada NI 9223, agar data tegangan bisa terbaca dan terukur.

3.1.9 Software LabVIEW

Software yang digunakan dalam alat eksperimen busur api listrik adalah LabVIEW versi 2012. LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) adalah *software* yang menggunakan bahasa pemrograman berbasis grafis (non-teks) untuk menciptakan sebuah aplikasi yang diinginkan *user*. LabVIEW mengeksekusi program dengan menjalankan pemrograman secara data *flow*, eksekusi dijalankan berdasarkan alur yang telah dibuat *user*. Dengan bahasa pemrograman grafis / blok diagram di dalamnya, LabVIEW dapat memperoleh data dari instrumen seperti cDAQ, memproses data dan

melakukan data logging atau perekaman data dalam file berformat tdms. Dari penjelasan diatas, pada eksperimen ini LabVIEW digunakan sebagai instrumentasi virtual untuk mengembangkan sistem pengambilan data dari pengukuran secara otomatis. Instrumentasi visual ini dapat mengendalikan pengukuran (proses pengambilan data) melalui perangkat *hardware* eksternal (cDAQ) yang bertindak sebagai akuisisi data, hasil pengukuran selanjutnya akan ditampilkan pada *front panel* LabVIEW melalui layar PC komputer seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Tampilan *front panel* dan *block diagram* pada LabVIEW untuk eksperimen busur api listrik

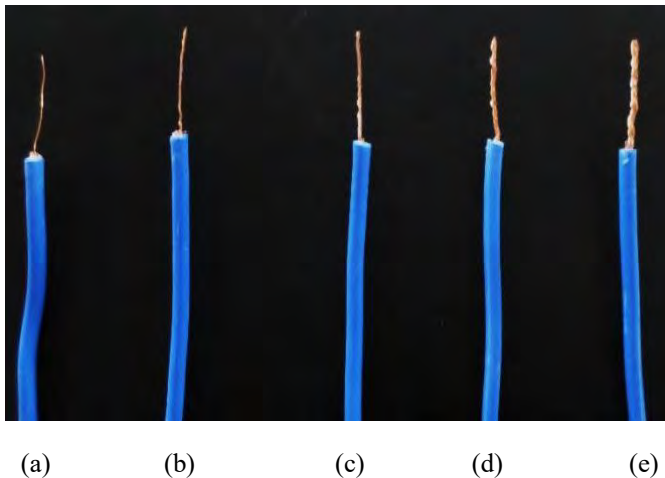
Front panel LabVIEW merupakan media tatap muka (*interface*) antara LabVIEW dan *user*. Di dalam LabVIEW digunakan *DAQ Assist* sebagai aplikasi pemrograman tatap muka (*Application Programming Interface/API*) dan juga sebagai *driver* yang mengontrol DAQ. *Front panel* LabVIEW yang digunakan dalam eksperimen ini tersusun dari 2 grafik yang menampilkan sinyal arus dan tegangan yang diakuisisi ketika pengukuran berlangsung. Sedangkan, pemrograman grafis pada LabVIEW pada tugas akhir ini dapat dilihat di lampiran 1.

3.2 Pengambilan Data

Proses pengambilan data pada Tugas Akhir ini melalui eksperimen langsung, yaitu menghubungkan singkatan kabel tegangan rendah yang dipasang secara parallel melalui sumber tegangan yang telah

terpasang peralatan pengaman berupa sekring otomatis. Data yang diambil meliputi arus *arc*ing, arus beban, tegangan *arc*ing, dan citra bergerak bunga api pada kabel ketika terjadi hubung singkat. Data arus dan tegangan diambil dengan frekuensi 10 kHz, dan data citra bergerak bunga api diambil dengan kecepatan 1200 fps.

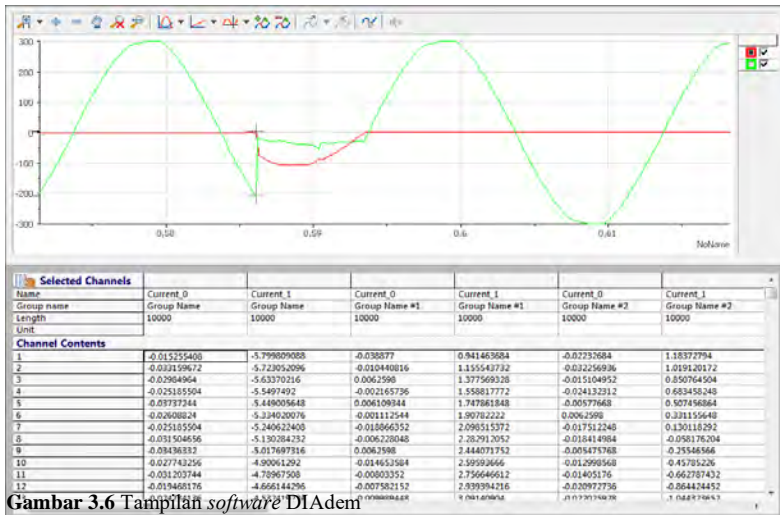
Proses pengambilan data busur api listrik memperhatikan jumlah serabut pada kabel yang menjadi objek tempat terjadinya busur api listrik. Percobaan akan dilakukan dengan melakukan variasi jumlah serabut. Variasi serabut yang digunakan adalah 1 serabut, 3 serabut, 6 serabut, 12 serabut, dan 24 serabut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4. Masing-masing variasi jumlah serabut akan berisi 5 kali percobaan busur api listrik. Jika dijumlah keseluruhan, maka akan didapat data sebanyak 25 buah.



Gambar 3.4 Variasi jumlah serabut kabel untuk eksperimen busur api listrik:
(a) serabut 1, (b) serabut 3, (c) serabut 6, (d) serabut 12, dan (e) serabut 24.

Pada saat eksperimen, busur api listrik akan dipicu menggunakan motor DC kecil sebagai penggerak kabel yang akan dihubungkan singkatkan. Kabel *Live* (biru) berada di sisi kontak statis, dan kabel *Neutral* (hitam) di sisi kontak dinamis. Ketika motor DC digerakkan, maka kabel *neutral* akan mengalami kontak. Posisi kabel

normal (1-2 *cycle*) dan sinyal saat terjadinya busur api listrik (1-2 sekon). Tampilan software DIAdem dapat dilihat pada Gambar 3.6.

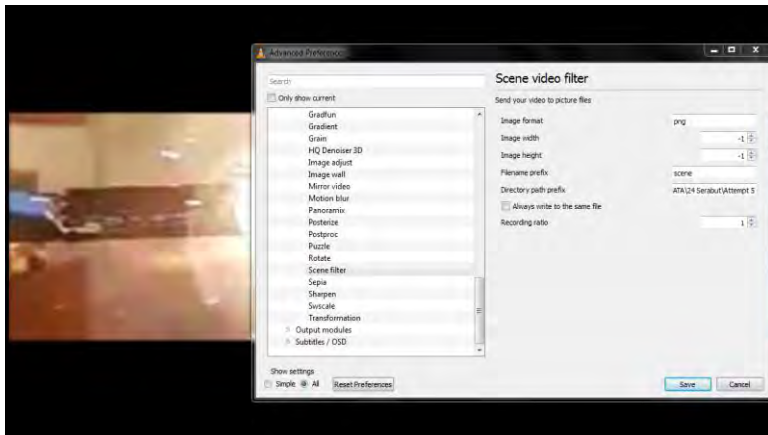


Gambar 3.6 Tampilan software DIAdem

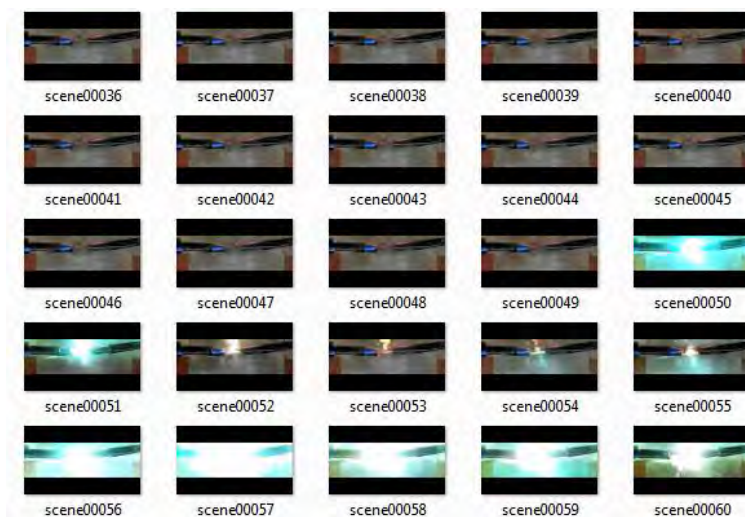
Pada DIAdem data dalam format ‘.tdms’ hasil keluaran LabVIEW ditampilkan dalam bentuk sinyal arus (I) dan tegangan (V) yang berisikan nilai amplitudo masing-masing sinyal sampling yang terbagi pada kanal (*channel*) sesuai jumlah sampling saat pengambilan data. Pemotongan sinyal dilakukan dengan cara mengambil nilai dari kanal DIAdem.

3.3.2 VLC Player: Scene Filter

Data citra bergerak (video) diolah menggunakan fitur *scene filter* pada VLC Player. Dengan fitur ini, video yang terdiri dari banyak frame bisa diekstrak per framenya, sehingga output dari pengolahan data ini adalah *still image* dari tiap frame pada rekaman citra bunga api ketika proses pengambilan data. Tampilan software VLC Player dengan *scene filter* dapat dilihat pada Gambar 3.7. Hasil output penggunaan scene filter dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.7 Tampilan *software* VLC Player dengan fitur *scene filter*.

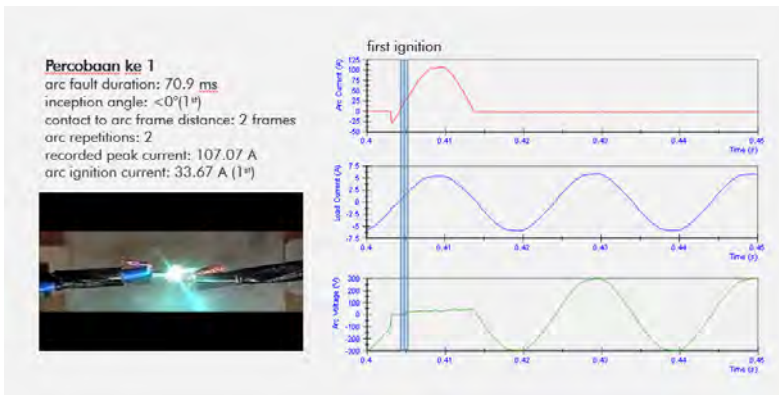


Gambar 3.8 Hasil pengolahan video menggunakan fitur *scene filter*.

3.3.3 Sinkronisasi Citra Bunga Api dengan Arus Hubung Singkat

Dalam melakukan sinkronisasi data, dibutuhkan suatu antar muka yang menunjukkan antara data arus-tegangan dengan gambar per frame secara simultan. Sinkronisasi dilakukan di Microsoft Power Point dikarenakan sistem pengambilan gambar terpisah dengan sistem perekaman arus-tegangan, sehingga diperlukan aplikasi tambahan selain DIAdem untuk mempermudah sinkronisasi.

Pengolahan pada Microsoft Power Point dilakukan dengan cara membuat plot hasil pengolahan arus dan tegangan pada DIAdem, kemudian grafik ini diberi *Band Cursor* sebagai *marker* frame pada gambar busur api. *Band Cursor* berbeda dengan *Crosshair Cursor* yang hanya menunjukkan titik terjadinya kejadian saja. *Band Cursor* menunjukkan area terjadinya kejadian. Lebar *band cursor* ini sebesar durasi transisi antar frame, yaitu sebesar 1/1200 sekon atau sebesar 0,8333 ms. Pemilihan frame yang ditampilkan memiliki kerapatan yang tinggi ketika fenomena busur api listrik terjadi Gambar 3.9 menunjukkan tampilan sinkronisasi data arus-tegangan dengan frame hasil ekstraksi video melalui *scene filter* pada VLC Player.



Gambar 3.9 Tampilan antarmuka dalam melakukan sinkronisasi data

Dari tampilan sinkronisasi, terdapat beberapa data yang ditampilkan. Berikut penjelasan dari masing-masing data yang ditampilkan:

- a. *Arc Fault Duration*
Arc fault duration adalah durasi terjadinya hubung singkat, baik ketika terjadi arc flash maupun tidak. Dengan kata lain, bisa dikatakan sebagai durasi arus arcing muncul.
- b. *Inception Angle*
Ide dari pengerjaan tugas akhir ini adalah untuk mengetahui pada nilai arus berapa *arc* mulai terpicu. Maka dari itu dibutuhkan posisi sudut arus ketika kabel tepat mengalami kontak. Sudut ini disebut *inception angle*.
- c. *Contact to Arc Frame Distance*
Dalam melakukan sinkronisasi arus dengan citra *arc*, maka dilakukan perhitungan melalui berapa jumlah frame ketika transisi dari kondisi tepat kontak hingga menuju terjadinya *arc ignition*. Jarak antara frame terjadinya kontak hingga terjadinya *arc ignition* disebut *Contact to Arc Frame Distance*.
- d. *Arc Repetitions*
Arc Repetitions adalah jumlah terjadinya flash selama fault terjadi hingga proses blast selesai.
- e. *Recorded Peak Current*
Recorded Peak Current merupakan nilai arus maksimum selama terjadinya fault.
- f. *Arc Ignition Current*
Arc Ignition Current merupakan nilai arus saat terjadinya *arc ignition*. Banyaknya nilai *Arc Ignition Current* tergantung dari jumlah *arc repetition*.

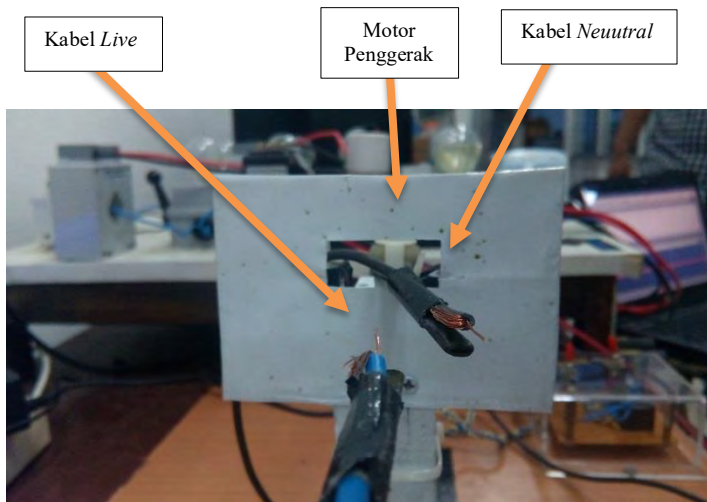
Dari serangkaian data di atas, nantinya akan ditentukan karakteristik dari *arc flash* pada kabel tegangan rendah pada kasus hubung singkat langsung.

BAB IV

ANALISIS DATA

4.1 Mekanisme Terjadinya Busur Api Listrik pada Tegangan Rendah

Pada pengambilan data, mekanisme busur api listrik yang terjadi adalah mekanisme busur api listrik akibat hubung singkat secara langsung. Hal ini dilakukan dengan cara menggerakkan kabel menggunakan motor DC kecil, kemudian gerakan dari motor DC ini akan menyebabkan kontak pada kabel yang bergerak (kabel *neutral*) kepada kabel yang diam (kabel *live*). Dari kontak kedua kabel ini, akan timbul busur api listrik akibat hubung singkat langsung fasa-netral. Ketika proses busur api terjadi, titik di tempat terjadinya busur api harus diisolasi terhadap obyek atau benda di sekitarnya yang berbahaya. *Arc Chamber* berbahan akrilik digunakan untuk mengisolasi area terjadinya busur api listrik, sehingga tidak membahayakan benda, obyek, dan juga user yang ada di sekitar area titik uji. Konstruksi kabel di dalam *Arc Chamber* dapat dilihat pada gambar 4.1.



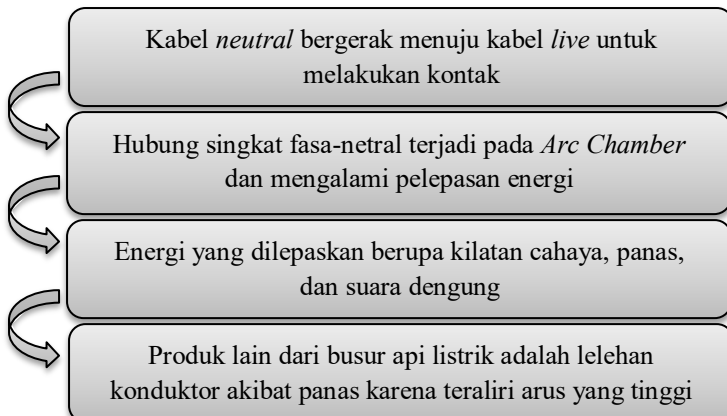
Gambar 4.1 Konstruksi kabel di dalam *Arc Chamber*. Gambar diambil saat kondisi sebelum busur api listrik terjadi.

4.1.1 Perekaman Data Arus, Tegangan, dan Citra Bergerak Bunga Api.

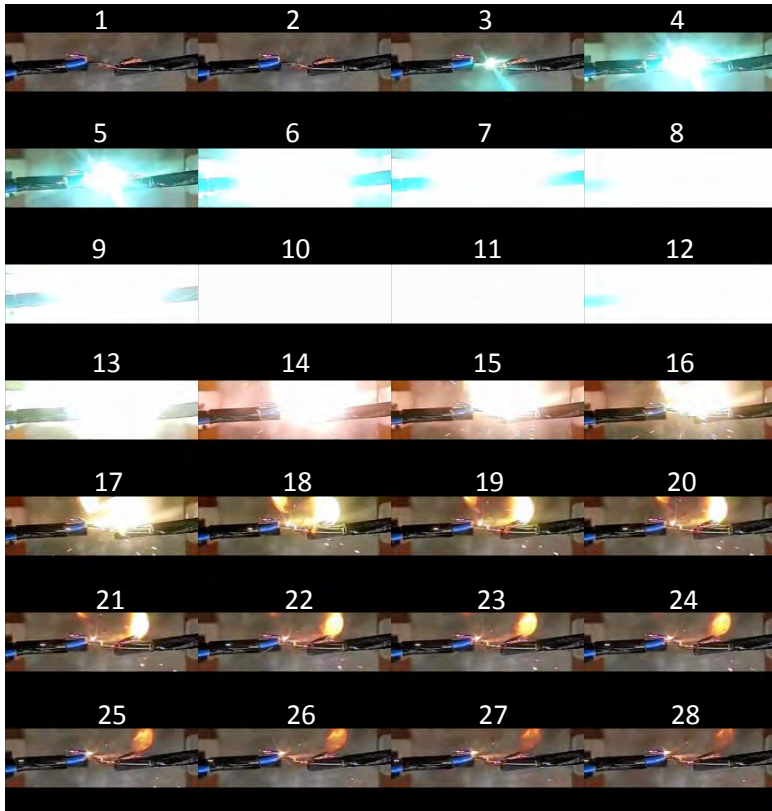
Busur api listrik diawali dengan terjadinya kontak pada dua konduktor dengan perbedaan potensial. Saat kontak terjadi, maka akan terjadi aliran arus yang relatif tinggi. Arus yang besar ini akan dilewatkan pada CT 200/5 yang terhubung pada NI 9246 untuk keperluan perekaman data. Di saat yang sama, ketika terjadi kontak, maka beda potensial antara kabel *live* dengan kabel *neutral* akan mengalami penurunan nilai yang drastis. Proses perubahan arus ini diukur menggunakan sensor tegangan Verivolt Entube DE-HB yang kemudian terhubung pada NI 9223.

Fenomena busur api listrik tidak hanya menimbulkan lonjakan arus yang tinggi. Fenomena busur api listrik juga menghasilkan produk lainnya yang berupa kilatan cahaya (*flash*) dengan intensitas yang tinggi, percikan api (*spark*), dan lelehan logam (*molten metals*) atau lelehan serabut konduktor yang menyebar ke segala arah akibat ekspansi tekanan udara yang besar dalam waktu yang singkat. Ketika fenomena ini terjadi, Casio EX-F1 akan merekam kejadian yang berlangsung di dalam *Arc Chamber*. Rekaman citra bergerak ini memiliki kecepatan sebesar 1200 fps, yang artinya setiap detiknya terdapat 1200 *frame* citra statik.

Dari proses pengambilan data, terjadinya busur api listrik pada kabel tegangan rendah dapat dijelaskan melalui mekanisme pada Gambar 4.2 dan citra statik terjadinya busur api listrik ditunjukkan oleh gambar 4.3.



Gambar 4.2 Mekanisme terjadinya busur api listrik pada kabel tegangan rendah akibat hung singkat langsung



Gambar 4.2 Citra statik per frame dari rekaman kejadian busur api listrik, bergerak dari kiri ke kanan, kemudian ke kiri lagi di baris berikutnya.

4.1.2 Sinkronisasi Data

Sinkronisasi diperlukan karena sistem akuisisi data terdiri dari dua sistem akuisisi yang independen. Proses sinkronisasi ini meliputi menampilkan grafik arus dan tegangan *arcing*, arus beban, dan juga gambar statik yang menampilkan kondisi kabel ketika mengalami hubung singkat.

4.2 Analisis Data Karakteristik Busur Api Listrik Tegangan Rendah pada Hubung Singkat Langsung

Pemotongan data arus dan tegangan dilakukan agar mempermudah dalam pemrosesan data yang terekam. Durasi data arus dan tegangan yang terekam adalah sepanjang 10 detik. Data ini nantinya akan dipotong menjadi sepanjang 1-2 detik saja (diambil pada posisi terjadinya *fault*). Setelah mendapatkan sinyal yang sudah dipotong, sinyal ditampilkan pada Tab Report pada DIAdem agar bisa diimpor ke Microsoft Power Point secara langsung untuk proses sinkronisasi.

Analisis karakteristik busur api listrik api listrik pada tegangan rendah meliputi analisis beberapa parameter seperti arus, tegangan, durasi dan citra statik dari busur api listrik yang terjadi. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan pengaruh variasi jumlah serabut yang digunakan. Citra statik yang didapatkan pada eksperimen busur api listrik merupakan konten utama dalam eksperimen ini. Dari kumpulan citra statik ini, akan diketahui bagaimana bentuk sinyal arus dan tegangan ketika kejadian hubung singkat berlangsung mulai dari kontak, *ignition*, *flash*, *sparking*, sampai lelehnya kabel konduktor.

Hasil analisa data yang telah disinkronisasikan meliputi arus maksimum yang terekam, *inception angle*, arus ketika terjadi *ignition*, jarak frame antara terjadinya kontak hingga terjadi *arc*, dan banyaknya repetisi *arc*.

4.2.1 Arus Maksimum

Arus maksimum adalah arus maksimum ketika *fault* terjadi. Penentuan arus maksimum menggunakan bantuan *crosshair cursor measurement* pada DIAdem. Data nilai arus maksimum ketika proses busur api terjadi bisa dilihat di Tabel 4.1. Nilai arus dalam satuan ampere.

Tabel 4.1 Data arus maksimum yang terekam selama eksperimen

Percobaan ke-	1 serabut	3 serabut	6 serabut	12 serabut	24 serabut
1	108.29	-117.74	107.07	-118.31	123.21
2	-105.12	105.92	108.92	122.76	-120.9
3	-106.04	-107.92	-110.59	119.62	116.73
4	-84.33	110.83	109.44	-113.79	113.98
5	99.66	109.7	115.98	122.26	-113.64

Dari Tabel 4.1, dapat diamati ternyata variasi serabut memiliki pengaruh dengan nilai arus maksimum yang bisa dilewatkan pada konduktor. Semakin banyak jumlah serabut yang mengalami kontak, maka semakin besar arus yang bisa dilewatkan. Namun perbedaan nilai arus tidak terlalu signifikan.

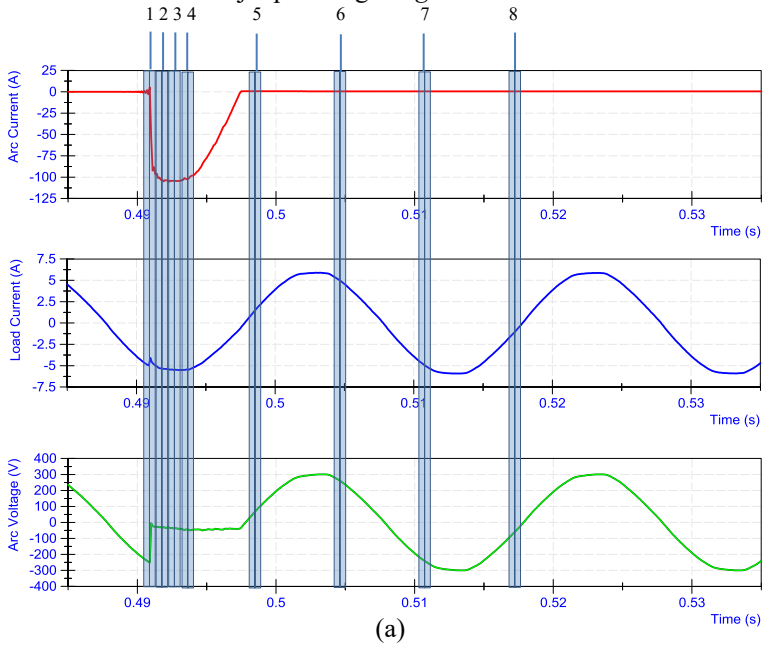
4.2.2 *Inception Angle*

Inception angle merupakan sudut ketika kontak terjadi. Nilai *inception angle* bukan suatu nilai derajat sudut, melainkan range sudut terjadinya *inception*. Range *inception angle* dalam eksperimen dibagi menjadi 4 area. Area pertama adalah nilai sudut antara 0-90°, atau sebelum *peak* arus positif ketika terjadi kontak. Area kedua adalah nilai sudut 90-180°, yaitu area ketika dari *peak* positif menuju titik *zero crossing* menuju polaritas negatif. Area ketiga adalah nilai sudut 180-270°, yaitu area setelah *zero crossing* dari positif ke negatif menuju *peak* arus negatif. Area yang keempat adalah nilai sudut 270-360°, yaitu dari *peak* arus negatif menuju *zero crossing*.

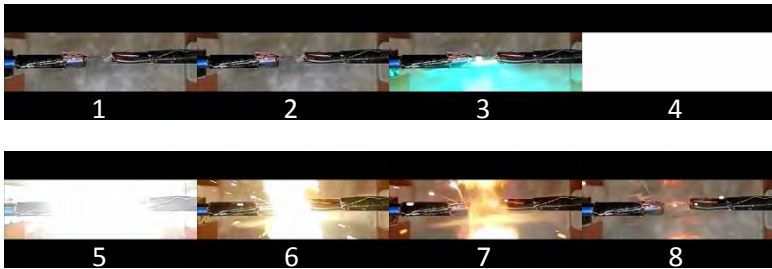
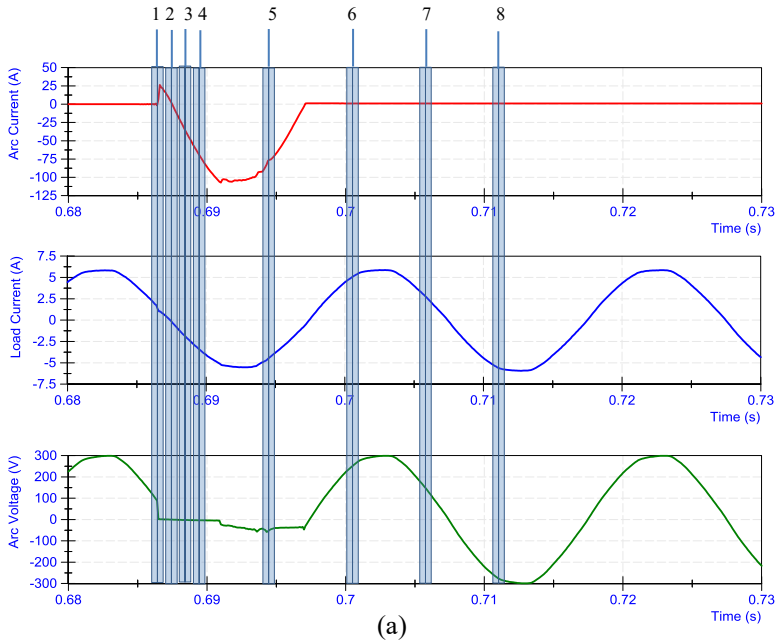
Dari hasil eksperimen didapatkan perilaku *arc flash* pada tiap area *inception angle*. Pada area *inception angle* pertama dan ketiga (menuju *peak* arus), jarak frame dari mulai terjadinya kontak sampai terjadinya *ignition* rata-rata sebesar 1 frame. Artinya, jarak terjadinya *ignition* atau mulainya peristiwa *arcing* dari mulainya kontak adalah sebesar 1/1200 sekon, atau 0.8333 milisekon. Sedangkan untuk *inception angle* pada area kedua dan keempat (arus hendak melewati *zero crossing*), jarak frame dari mulai terjadinya kontak sampai terjadinya *ignition* rata-rata lebih dari atau sama dengan 2 frame. Gambar 4.3 menunjukkan hasil eksperimen dengan *inception angle* pada area ketiga. Gambar 4.4 menunjukkan hasil eksperimen dengan *inception angle* pada area kedua.

Dari data yang didapat, penyebab jarak frame dari kontak menuju *ignition* pada area kedua dan keempat lebih besar adalah ada fenomena transisi perubahan polaritas. Ketika polaritas berubah, maka ada titik dimana nilai arus sama dengan nol. Ketika arus sama dengan nol, maka daya di titik tersebut sama dengan nol. Konduktor berada di fase ketika tidak ada arus yang mengalir. Oleh karena itu, proses busur api listrik mengalami penundaan (*delay*). Efek lain yang ditimbulkan adalah, arus saat terjadi *ignition* pada area *inception angle* area kedua dan keempat memiliki perilaku yang berbeda dengan arus saat terjadi

ignition pada area *inception angle* pada area pertama dan kedua. Efek ini akan dibahas lebih lanjut pada bagian *ignition current*.



Gambar 4.3 Grafik hasil eksperimen dengan *inception angle* area ketiga (a), dengan tampilan citra statik per frame (b) yang menunjukkan kejadian yang sesuai ditunjukkan kursor pada grafik arus dan tegangan.



Gambar 4.4 Grafik hasil eksperimen dengan *inception angle* area kedua (a), dengan tampilan citra statik per frame (b) yang menunjukkan kejadian yang sesuai ditunjukkan kursor pada grafik arus dan tegangan.

4.2.3 Arc Ignition Current

Arc Ignition Current adalah nilai arus ketika terjadinya proses pemecuan busur api listrik atau *arc ignition*. Seperti yang dibahas pada analisa data *inception angle*, *inception angle* memiliki pengaruh terhadap nilai arus pemecuan busur api listrik. Di dalam pembahasan *ignition angle* telah diklasifikasikan empat area terjadinya *inception angle*. Pada analisa *arc ignition current*, faktor *inception angle* diperlukan sebagai pertimbangan.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa busur api listrik dengan *inception angle* pada area kedua dan keempat nilainya lebih kecil daripada dengan busur api listrik yang terjadi pada *inception angle* area pertama dan ketiga. Tabel 4.2 menunjukkan nilai *arc ignition current* yang terjadi ketika kabel mengalami kontak. Nilai arus yang tertera memiliki satuan ampere. Tabel 4.1 yang menunjukkan nilai arus maksimum bisa digunakan sebagai komparasi dengan Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data nilai *arc ignition current* saat kontak berlangsung pada eksperimen.

Percobaan ke-	1 serabut	3 serabut	6 serabut	12 serabut	24 serabut
1	106.94	55.93	33.67	-91.92	96.91
2	-103.77	42.67	52.16	n/a	-110.31
3	-58.61	-78.79	83.51	-51.20	101.11
4	-43.15	-42.87	107.77	-111.91	-98.45
5	55.93	83.51	109.42	80.76	112.76

Dalam eksperimen pada jumlah serabut banyak, jumlah pengulangan atau repetisi terjadinya *arc* rata-rata jumlahnya lebih dari satu. Pada kasus dengan kejadian busur api listrik yang mengalami *arc repetition* lebih dari satu, faktor *inception angle* tetap berpengaruh meskipun sebelumnya sudah terjadi kontak.

4.2.4 Arc Flash Repetition

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, pada jumlah serabut banyak, busur api mengalami pengulangan atau repetisi. Jumlah repetisi ini disebut *arc flash repetition*. Pada jumlah serabut yang sedikit, jumlah *arc flash repetition* rata-rata hanya satu kali. Hal ini dikarenakan semakin banyak jumlah serabut, maka kabel akan semakin tahan ketika dilewati

arus yang besar. Pengaruh lainnya adalah, semakin banyak jumlah repetisi, maka durasi *fault* semakin panjang. Tabel 4.3 menunjukkan jumlah pengulangan *arcing* atau *arc flash repetition* eksperimen kali ini.

Tabel 4.3 Data *arc flash repetition* pada eksperimen.

Percobaan ke-	1 serabut	3 serabut	6 serabut	12 serabut	24 serabut
1	1	1	2	3	1
2	1	1	3	3	3
3	1	1	3	5	5
4	1	2	2	5	5
5	1	1	3	3	4

4.2.5 Fault Duration

Seperti yang dijelaskan pada bagian *arc repetition*, bahwa durasi *fault* bisa berpengaruh pada jumlah repetisi busur api listrik. Dari hasil eksperimen, jumlah serabut yang sedikit memiliki rata-rata durasi *fault* yang singkat (rata-rata 7.14 milisekon). Sedangkan hasil eksperimen dengan jumlah serabut yang banyak memiliki rata-rata durasi *fault* yang panjang. Tabel 4.4 menunjukkan durasi *fault* selama eksperimen berlangsung.

Tabel 4.4 Data durasi *fault* pada eksperimen.

Percobaan ke-	1 serabut	3 serabut	6 serabut	12 serabut	24 serabut
1	5	271.4	70.9	97.4	1,625.88
2	6.6	9.8	162.9	1,492.90	1,847.40
3	10.8	8.59	23	822.3	146.9
4	2.8	12.6	25	55	155.8
5	10.5	8.6	214.2	618.6	134.90

Selama proses pengambilan data, pada eksperimen dengan jumlah serabut yang banyak sempat mengalami *fuse trip*. Eksperimen yang mengalami *fuse trip* adalah eksperimen kedua pada serabut 12, eksperimen pertama pada serabut 24 dan eksperimen kedua pada serabut 24. Ketiga eksperimen tersebut memiliki durasi *fault* lebih dari satu sekon (rata-rata 1.6553 sekon). Dari fenomena ini, dapat diketahui bahwa respon pengaman arus lebih (sekring otomatis) akan mengalami *trip* ketika durasi

arus lebih selama sekitar 1.5 sekon. Tabel 4.5 menunjukkan data eksperimen yang mengalami *fuse trip*.

Tabel 4.5 Data status *fuse trip* pada eksperimen.

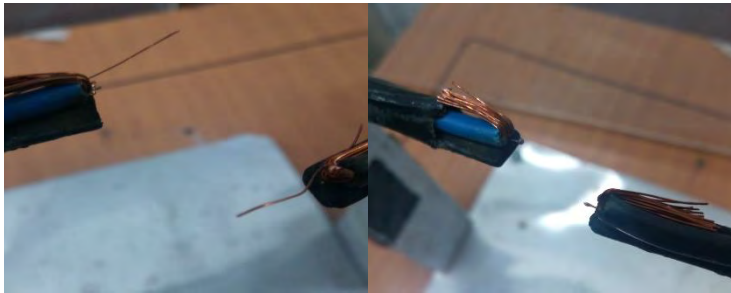
Percobaan ke-	1 serabut	3 serabut	6 serabut	12 serabut	24 serabut
1	No	No	No	No	Yes
2	No	No	No	Yes	Yes
3	No	No	No	No	No
4	No	No	No	No	No
5	No	No	No	No	No

4.2.6 Fenomena Post-Fault

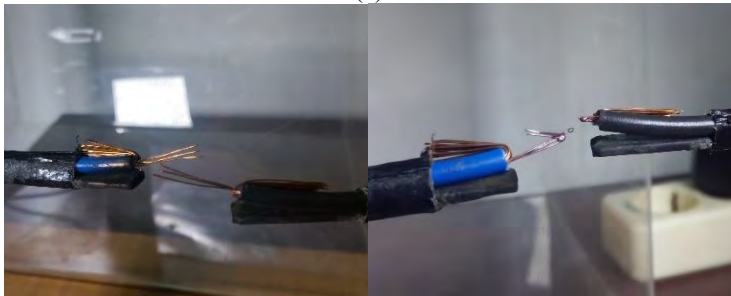
Fenomena busur api listrik menghasilkan pelepasan energi yang berupa kilauan cahaya atau *flash* yang memiliki intensitas tinggi, suara dengung, dan panas. Akibat lain yang ditimbulkan ketika fenomena busur api listrik terjadi adalah timbulnya percikan (*spark*) api dan hempasan lelehan metal yang berpendar dan menyebar ke segala arah.

Pada eksperimen, beberapa fenomena *post-fault* adalah terbakar habisnya konduktor kabel, menempelnya kabel *live* dan kabel *neutral*, dan juga timbulnya *sparking*. Dalam analisa fenomena kali ini, dapat diklasifikasikan dua macam fenomena *post-fault* yang bisa diamati. Yang pertama adalah fenomena makro, yaitu fenomena yang bisa diamati setelah terjadinya *fault* (logam yang meleleh). Dan yang kedua adalah fenomena mikro, yaitu fenomena yang berlangsung sangat cepat dan bisa diamati melalui alat bantu (kondisi kabel sesaat setelah *fault* selesai).

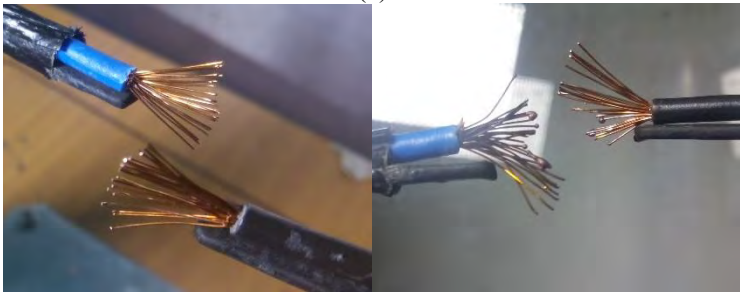
Pada fenomena makro *post-fault*, yang dapat diamati adalah kondisi konduktor kabel setelah dilakukan eksperimen. Pada fenomena makro dengan variasi jumlah serabut sedikit (1 serabut), konduktor yang diuji mengalami *melting* secara keseluruhan. Artinya, setelah eksperimen selesai, tidak ada sisa konduktor lagi yang ada (panjang sisa konduktor dihitung dari ujung isolasi kabel yang dipotong). Dengan variasi jumlah serabut yang lebih banyak, maka sisa konduktor setelah mengalami *fault* masih tersisa cukup banyak, atau bahkan masih utuh (untuk kasus eksperimen yang mengalami *fuse trip*). Gambar 4.5 menunjukkan salah satu hasil eksperimen yang mengamati fenomena makro *post-fault*.



(a)



(b)

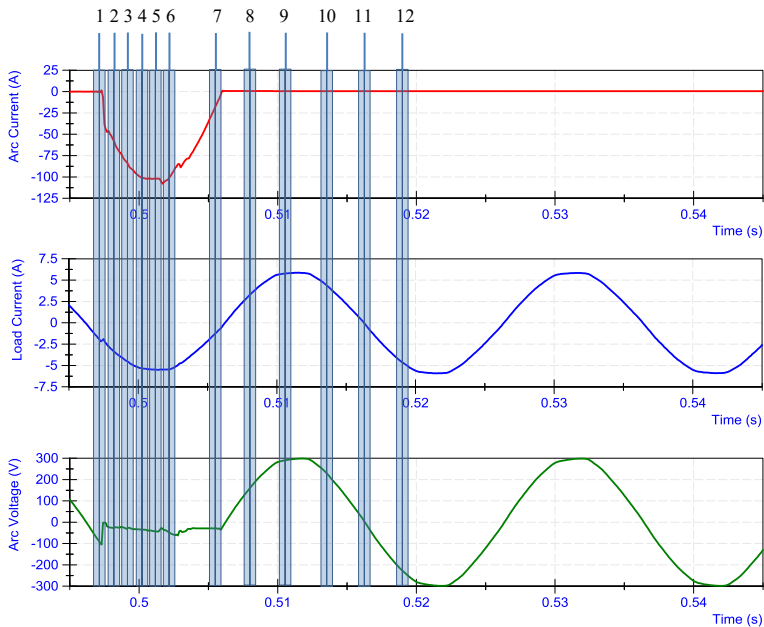


(c)

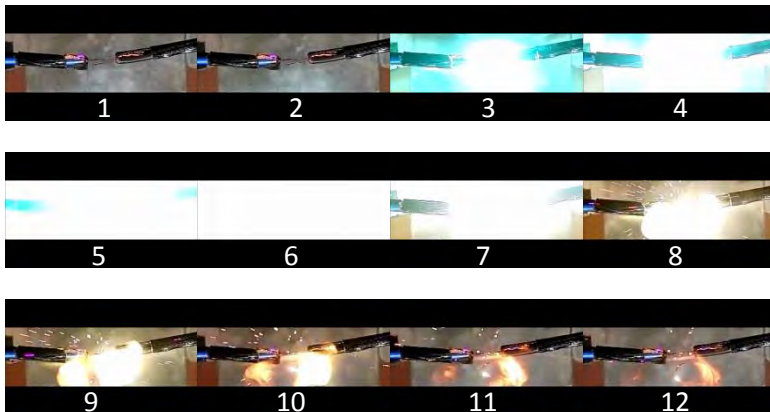
Gambar 4.5 Fenomena makro *post-fault* pada eksperimen variasi 1 serabut (a), 3 serabut (b), dan 12 serabut (c). Gambar di sebelah kiri adalah kondisi sebelum eksperimen dilakukan, dan gambar di kanan adalah setelah dilakukan eksperimen.

Pada gambar 4.5 kiri menunjukkan kondisi kabel ketika sebelum dikondisikan *fault*. Pada fase ini bisa dilihat kondisi kabel konduktor yang masih sehat. Jika dibandingkan dengan gambar 4.5 kanan, pada variasi 1 serabut, tidak ada konduktor yang tersisa. Semuanya habis karena telah meleleh. Variasi tiga serabut menunjukkan adanya konduktor kabel *neutral* yang sempat meleleh namun elehannya menempel pada kabel *live*. Sedangkan pada variasi 12 serabut, beberapa konduktor mengalami *melting*, namun masih ada beberapa helai konduktor yang masih utuh.

Pada analisa fenomena mikro *post-fault*, digunakan data dari pengambilan citra bergerak. Fenomena mikro merupakan fenomena sesaat yang terjadi setelah arus hubung singkat selesai atau *fault* sudah tidak terjadi. Gambar 4.6 menunjukkan beberapa foto hasil ekstraksi frame melalui VLC Player Scene Filter pada suatu eksperimen.



(a)



(b)

Gambar 4.6 Grafik hasil eksperimen dengan variasi 3 serabut (a). Tampilan citra statik per frame pada eksperimen (b) menunjukkan step frame ketika proses busur api listrik berlangsung.

Pada gambar 4.6(a), ketika kursor menunjukkan kursor ketujuh adalah kursor di mana *fault* tepat akan berakhir. Pada frame ketujuh pada gambar 4.6(b), citra statik yang ditampilkan adalah masih berupa kilatan *post-flash* pada frame keenam. Sedangkan pada frame kedelapan, citra statik yang ditampilkan berupa *sparking* dan letupan. Jika dilanjutkan ke frame sembilan sampai dua belas, terlihat jelas bahwa *debris* yang berupa lelehan konduktor (*molten metals*) menyebar ke segala arah. Jika ditinjau dari gambar 4.6(a), saat kursor menunjukkan kejadian kedelapan, *fault* telah selesai. Sehingga, dapat dikatakan bahwa peristiwa *sparking* atau bunga api terjadi sesaat setelah *fault* selesai.

4.2.7 Penggantian *Fuse* Otomatis dengan MCB

Pada eksperimen ini, percobaan tidak hanya dilakukan pada obyek *fuse* otomatis. Eksperimen ini juga menguji obyek MCB.

Penggunaan MCB digunakan karena secara umum instalasi pemukiman, lebih banyak menggunakan MCB dibandingkan *fuse* otomatis. Hal ini dikarenakan MCB sifatnya lebih praktis dan kompak dibandingkan *fuse* otomatis, sehingga penggunaan *fuse* otomatis mengalami penurunan. Namun pada instalasi listrik pada pasar tradisional masih banyak yang menggunakan *fuse* otomatis karena memiliki mekanisme *interlocking* manual yang lebih aman dibandingkan MCB ketika sedang ada pemeliharaan, perbaikan atau penambahan jalur.

Dari hasil percobaan menggunakan MCB, semua varian jumlah serabut mengalami trip dengan rata-rata durasi fault sebesar setengah *cycle* atau sebesar 10 ms dan pengulangan *arc flash* hanya satu kali. Untuk karakteristik arus maksimum, arus penyalan dan fenomena *post-fault* menunjukkan karakteristik yang sama seperti saat menggunakan *fuse* otomatis.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari eksperimen dan analisis fenomena busur api listrik tegangan rendah pada kasus hubung singkat langsung melalui sinkronisasi penginderaan bunga api dan arus hubung singkat adalah sebagai berikut:

1. Variasi jumlah serabut pada eksperimen menunjukkan bahwa banyaknya serabut berpengaruh terhadap nilai arus maksimum dan durasi *fault* (khusus durasi *fault* berlaku untuk *fuse* otomatis). Ketika proses hubung singkat berlangsung, maka arus yang besar mengalir pada konduktor. Jika arus yang besar ini melewati satu serabut, maka serabut tidak akan bertahan lama, sehingga durasi *fault* lebih singkat
2. Variasi jumlah serabut juga menunjukkan fenomena pengulangan *ignition* pada busur api listrik. Semakin banyak jumlah serabut, maka kemungkinan terjadinya *arc flash repetition* semakin besar, dan berdampak pada durasi *fault*.
3. *Inception angle* menentukan besar arus ketika proses *ignition* berlangsung. Pada eksperimen, ditentukan empat area *inception angle*. Pada area *inception angle* pertama dan ketiga (menuju *peak* arus), proses terjadinya *ignition* sejak terjadinya kontak lebih cepat dibandingkan dengan proses kontak pada *inception angle* area kedua dan keempat (transisi *zero crossing* pada arus).
4. Banyaknya jumlah serabut yang mengalami kontak fenomena makro *post-fault* yang terjadi, yaitu kondisi konduktor setelah terjadinya usur api listrik. Busur api listrik dengan serabut yang sedikit menyebabkan melelehnya konduktor secara cepat, sehingga durasi *fault* menjadi singkat. Pada busur api listrik dengan serabut yang banyak, konduktor fasa dan netral dimungkinkan mengalami kontak kemudian menempel, sehingga durasi arus hubung singkat lebih lama, dan bisa berakibat menyebabkan *fuse* otomatis mengalami trip.

5. Proses terjadinya lucutan bunga api (*sparking*) merupakan suatu fenomena mikro *post-fault*. Artinya, fenomena *sparking* berlangsung ketika proses *fault* telah selesai, bukan saat *fault* berlangsung.
6. Hasil evaluasi pengaman instalasi tegangan rendah menunjukkan bahwa *fuse* otomatis mengalami waktu trip yang lebih lama, sehingga bisa menyebabkan durasi *fault* yang lebih lama. Sedangkan untuk pengaman MCB menunjukkan waktu trip yang cepat, yaitu sesaat setelah terjadinya *fault*.

5.2 Saran

Eksperimen analisa busur api listrik tegangan rendah melalui sinkronisasi penginderaan bunga api dan arus hubung singkat telah mampu menunjukkan beberapa karakteristik busur api listrik seperti arus puncak, *ignition current*, *inception angle*, durasi *fault* dan fenomena *post-fault*. Tetapi, diperlukan alat eksperimen yang lebih otomatis dan terkontrol agar mempermudah dalam proses perekaman dan pengolahan data.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K.Mishra, A.Routray, and A. K. Pradhan, “*Detection of Arcing in Low Voltage Distribution Systems*”, IEEE Region 10 Colloquium and the Third International Conference on Industrial and Information Systems 2008, pp. 1-3
- [2] National Fire Protection Association, “*NFPA 70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace*”, NFPA 2004
- [3] J.M. Martel, M. Anheuser, and F. Berger, “*A Study of Arcing Fault in The Low-Voltage Electrical Installation*”, IEEE 2010, pp. 1-11
- [4] Badan Standarisasi Nasional. 2000. *Persyaratan Umum Instalasi Listrik*. Jakarta. BSN.
- [5] Berdasarkan data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) periode Agustus 2011-2015
- [6] Albert M. Smoak, P.E., Adam J. Keeth, “*An Investigation of Low Voltage Arc Flash Exposure*”, IEEE 2013, pp. 183-185.
- [7] G. Artale, A. Cataliotti, V. Cosentino, and G. Privitera, “*Experimental Characterization Of Series Arc Faults In AC And DC Electrical Circuits*,” 2014, pp. 1015–1020.
- [8] N. K. Medora and A. Kusko, “*Arcing Faults In Low And Medium Voltage Electrical Systems - Why Do They Persist?*,” 2011, pp. 1–6.
- [9] E. Carvou, N. Ben Jemaa, S. Tian, Z. Belhaja, and B. Jusselin, “*Electrical Arc Characterization For Ac-Arc Fault Applications*,” 2009, pp. 22–27.
- [10] Pengfei Zhang, Guoguang Zhang, Yengsan Geng, Yi Zhang, Jie Wu and Boyu Yang, “*The Optimum Structural Design of Low-voltage Arc Chamber Based on Simulation and Analysis of Flow Field*”, 2011 1st International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology, pp. 440-443.
- [11] J. W. McBride, K. Pechrach, and P. M. Weaver, “*Arc Motion and Gas Flow in Current Limiting Circuit Breakers Operating with A Low Contact Switching Velocity*” IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 25, No. 3, September 2002, pp.427-433.
- [12] George Roscoe, P.E. Marcelo E. Valdes, P.E. Ray Luna, “*Methods For Arc-Flash Detection In Electrical Equipment*”, IEEE 2010, pp. 1-8.



Muhammad Yusron Irsyadi, anak ketiga dari 4 bersaudara. Penulis biasa dipanggil Yusron. Penulis lahir dikota Jombang pada 30 Januari 1994. Penulis memulai pendidikannya dari TK Miftahul Huda pada tahun 1998-2000, kemudian melanjutkan studi di SDN 1 Plandi pada tahun 2000-2006, SMP Negeri 1 Jombang pada tahun 2006-2009, SMA Negeri 2 Jombang pada 2009-2012, dan penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga saat ini. Konsentrasi penulis adalah pada bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga. Penulis pernah aktif di UKM Robotika ITS sebagai Ketua Divisi Roboboat pada masa periode 2014-2015. Selain itu, penulis juga aktif dalam kepengurusan kepanitiaan event atau pelatihan yang dilaksanakan di jurusan Teknik Elektro maupun di tingkat universitas, yaitu sebagai Wakil Koordinator Sie Dokumentasi Electra 2013, Anggota Sie Wahana Teknologi EE Event 2014 dan 2015, Anggota Sie Wahana Teknologi ITS Expo 2014, dan lain-lain. Saat ini penulis aktif sebagai Asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro ITS.